

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Rotacijsko optiskivanje topničkih cijevi

Mentor:
Prof. dr. sc. Miljenko Math

Student:
Mihael Lach

Zagreb, 2013

IZJAVA

Izjavljujem da sam završni rad „Rotacijsko optiskivanje topničkih cijevi“ izradio samostalno korištenjem navedene stručne literature uz prijedloge i sugestije mentora te znanja i iskustava koje sam stekao tijekom studiranja.

Zahvaljujem se prof.dr.sc. Miljenku Mathu i dr.sc. Zdenki Keran na pruženoj stručnoj pomoći, savjetima tijekom izrade ovog završnog rada i preporučenoj literaturi.

SADRŽAJ

SADRŽAJ	3
POPIS SLIKA	4
POPIS TABLICA.....	5
POPIS OZNAKA	6
SAŽETAK.....	7
1. UVOD	8
2. RAZRADA TEME.....	10
2.1. Razvoj rotacijskog optiskivanja.....	10
2.2. Podjela rotacijskog optiskivanja	14
2.2.1. Rotacijsko optiskivanje bez promjene debljine stjenke obratka	14
2.2.2. Rotacijsko optiskivanje sa promjenom debljine stjenke obratka	16
2.2.2.1. Istosmjerno rotacijsko optiskivanje.....	16
2.2.2.2. Protusmjerno rotacijsko optiskivanje	18
2.3. Ograničenja parametara obrade	19
2.4. Prednosti rotacijskog optiskivanja u odnosu na ostale tehnološke posupke.....	20
3. PRIMJENA ROTACIJSKOG OPTISKIVANJA U PROIZVODNJI TOPNIČKIH	21
CIJEVI.....	21
3.1. Materijali koji se koriste za izradu dijelova oružja.....	21
3.2. Svojstva čelika za cijevi topničkog oružja	22
3.3. Promjena mehaničkih svojstava obratka u postupku rotacijskog optiskivanja	25
3.3.1. Promjena svojstava hladno deformiranih kovina.....	26
3.3.2. Analiza mehanizma očvršćenja materijala za toplo i hladno oblikovanje	27
3.3.3. Promjena veličine zrna.....	30
3.4. Analiza naprezanja i deformacija obratka	31
3.5. Deformacijske sile	34
3.6. Točnost i kvaliteta obrade.....	37
3.7. Temperatura obrade i podmazivanje	38
4. ZAKLJUČAK	39
5. LITERATURA.....	40

POPIS SLIKA

Slika 1.1	Shema rotacijskog optiskivanja
Slika 1.2	Primjeri obradaka rotacijskog optiskivanja
Slika 2.1	Klasičan stroj za rotacijsko optiskivanje
Slika 2.2	Klasičan stroj za rotacijsko optiskivanje sa spojnom polugom
Slika 2.3	Klasičan stroj za rotacijsko optiskivanje sa križnim klizačem
Slika 2.4	CNC upravljani stroj za rotacijsko optiskivanje sa PNC-om
Slika 2.5	Podjela rotacijskog optiskivanja
Slika 2.6	Shema hladnog rotacijskog optiskivanja konusnog dijela
Slika 2.7	Cilindrično smično optiskivanje sa jednim prolazom
Slika 2.8	Shema istosmjernog rotacijskog optiskivanja sa promjenom debljine stijenke
Slika 2.9	Protusmjerno rotacijsko optiskivanje s promjenom debljine stijenke
Slika 3.1	Promjene fizičko-mehaničkih svojstava ovisno o stupnju deformacije pri plastičnoj deformaciji kovina u hladnom stanju
Slika 3.2	Krivulja očvršćivanja prvog reda
Slika 3.3	Promjena veličina zrnaca i mehaničkih svojstava ovisno o stupnju deformacije za čelik Č 4732 (42 CrMo 4); (broj okretaja $n = 200 \text{ min}^{-1}$; posmak $f = 1 \text{ mm / okr.}$)
Slika 3.4	Geometrijski odnosi obratka i sirovca
Slika 3.5	Zona deformiranja i naprezanja kod rotacijskog optiskivanja sa promjenom debljine stijenke
Slika 3.6	Naprezanja u zoni deformiranja kod rotacijskog optiskivanja sa promjenom debljine stijenke
Slika 3.7	Komponente sila

POPIS TABLICA

Tablica 3.1.	Kemijski sastav nekoliko čelika za cijevi
Tablica 3.2.	Mehanička svojstva čelika iz tablice 3.1.
Tablica 3.3.	Oružja kod kojih se čelici navedeni u tablici 3.1. koriste za cijevi
Tablica 3.4.	Podaci o promjeni mehaničkih svojstava tijekom obrade rotacijskim optiskivanjem
Tablica 3.5.	Odstupanje dimenzija obratka kod rotacijskog optiskivanja sa promjenom debljine stjenke u ovisnosti od domenzija (mm)
Tablica 3.6.	Temperature pri rotacijskom optiskivanju kod povišenih temperatura

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
s	mm	debljina stjenke
s_0	mm	početna debljina stjenke
$\varepsilon, \psi, \varphi$	%	stupanj deformacije
K	MPa	stvarno naprezanje
e_0	mm	poprečni presjek nedeformirane epruvete
$e_{0,2}$	mm	poprečni presjek epruvete pri deformaciji od 0,2%
F_M	kN	vlačna sila epruvete pri vlačnoj čvrstoći materijala R_m
D_0	mm	promjer početnog diska
d_1	mm	promjer trupca
h	mm	put valjka
ρ_w	mm	radijus valjka
d_w	mm	promjer valjka
d	mm	promjer gotovog proizvoda
$\sigma_R, \sigma_Z, \sigma_T$	Pa	radijalno, aksijalno i tangencijalno naprezanje
A_R, A_Z, A_T	mm ²	Projekcija površine alata na materijal u radijalnom, aksijalnom i tangencijalnom smjeru
$\varepsilon_R, \varepsilon_Z, \varepsilon_T$		Relativna deformacija u radijalnom, aksijalnom i tangencijalnom smjeru
F_R, F_Z, F_T	N	Sile u radijalnom, aksijalnom i tangencijalnom smjeru
μ_1		koeficijent trenja između kalupa i unutarnje stjenke obratka
μ_2		koeficijent trenja između alata i materijala
ρ_w	mm	polovica presjeka alata u zahvatu
d_w	mm	promjer valjka

SAŽETAK

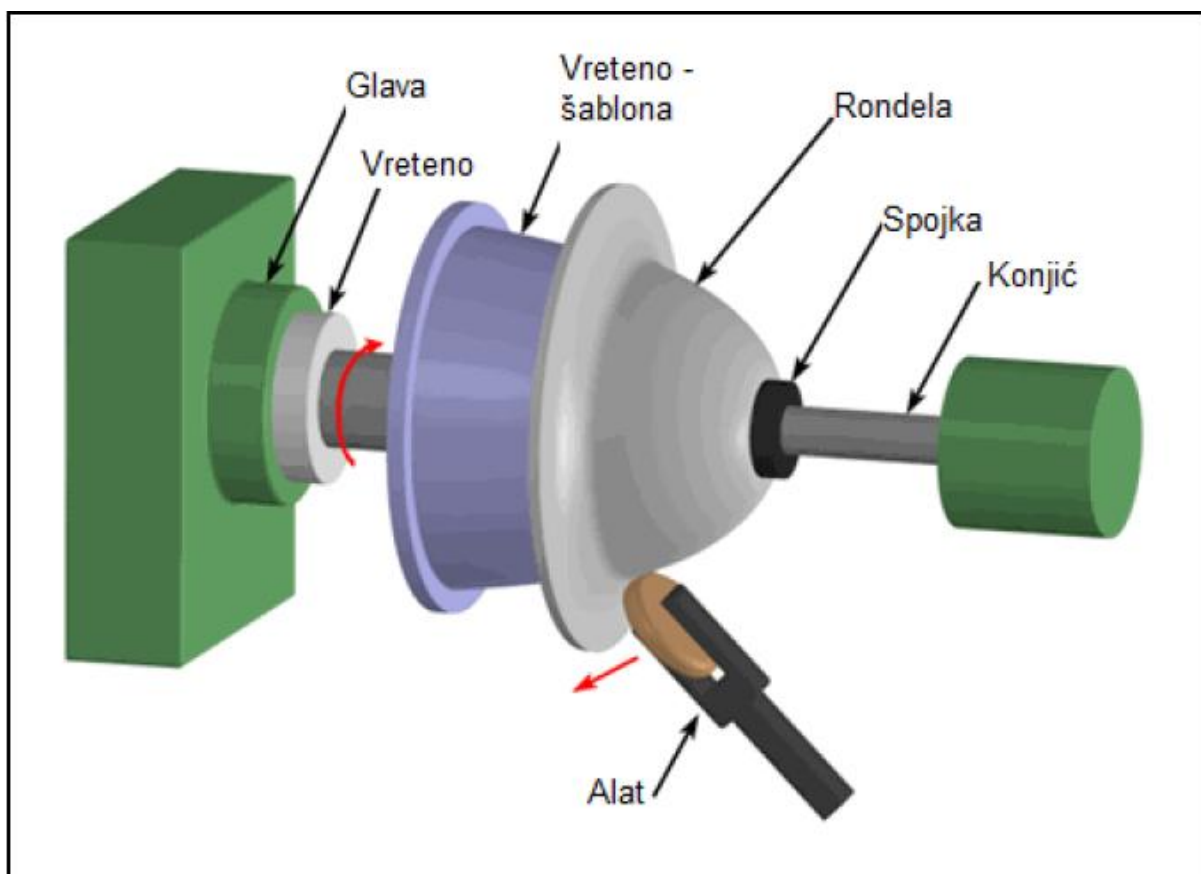
U radu je opisan postupak rotacijskog optiskivanja topničke cijevi. Opisane su vrste tehnologija rotacijskog optiskivanja. Pojašnjeni su načini tečenja materijala, sile deformiranja, mehanička očvrsnuća uz pretpostavke da se postupak obavlja u hladnom stanju, ali i specifičnosti kada se ovaj postupak provodi u toplom ili polutoplom stanju. Navedeni su materijali pogodni za proizvodnju topničkih cijevi, točnost obratka i kvaliteta površine te ograničenja u pogledu brzine pomaka i brzine optiskivanja, a jednako tako i problemi podmazivanja u primjeni ovih tehnologija. Dan je pristup proračunu potrebnih sila, odnosno energija deformiranja.

1. UVOD

Rotacijsko optiskivanje predstavlja tehnološki postupak kojim se deformiranjem metalnog materijala profiliranim valjcima (rolnicima) na specijalnim trnovima, dobivaju šuplji konični i cilindrični dijelovi. S obzirom na kvalitetu obrađene površine rotacijsko optiskivanje predstavlja završnu obradu. Obrade rotacijskim optiskivanjem vrše se postupcima bez promjene debljine stijenke ili sa promjenom debljine stijenke koja će biti obrazložena na primjeru topničke cijevi.

Prema smjeru tečenja materijala u odnosu na smjer gibanja alata dobivenih izradaka postupak rotacijskog optiskivanja sa promjenom debljine stijenke se dijeli na:

- istosmjerno hladno rotacijsko optiskivanje cilindričnih dijelova
- protusmjerno hladno rotacijsko optiskivanje cilindričnih dijelova



Slika 1.1. Shema rotacijskog optiskivanja [1]

Slika 1.1. prikazuje shematski pregled rotacijskog optiskivanja.

Rotacijsko optiskivanje može se izvoditi u kombinaciji sa drugim postupcima tehnologije deformiranja pa se tako vrlo dobro može kombinirati sa dubokim vučenjem. Pri tome u pravilu operacija dubokog vučenja prethodi rotacijskom optiskivanju koje obradak dovodi do konačnih dimenzija i oblika.

Rotacijsko optiskivanje se najčešće izvodi u hladnom stanju. Samo u nekim posebnim slučajevima (npr. teško obradiv materijal, komplicirana geometrijska izvedba radnog komada i sl.) može se pripremak prije obrade zagrijati na povišenu temperaturu.

Značajan iskorak u razvoju i primjeni ove tehnologije dali su NC i CNC upravljački uređaji koji su na strojevima za rotacijsko optiskivanje vrlo uspješno primijenjeni. Tehnologija rotacijskog optiskivanja kompatibilna je i sa najnovijim tehnologijama razvoja u okviru proizvodnih tehnologija – robotikom i fleksibilnim obradnim sustavima.

Tipični dijelovi izrađeni postupkom rotacijskog optiskivanja su, na primjer: lijevak, kućišta svjetiljki, poklopci spremnika itd. Neki od tih primjera dani su slici 1.2.



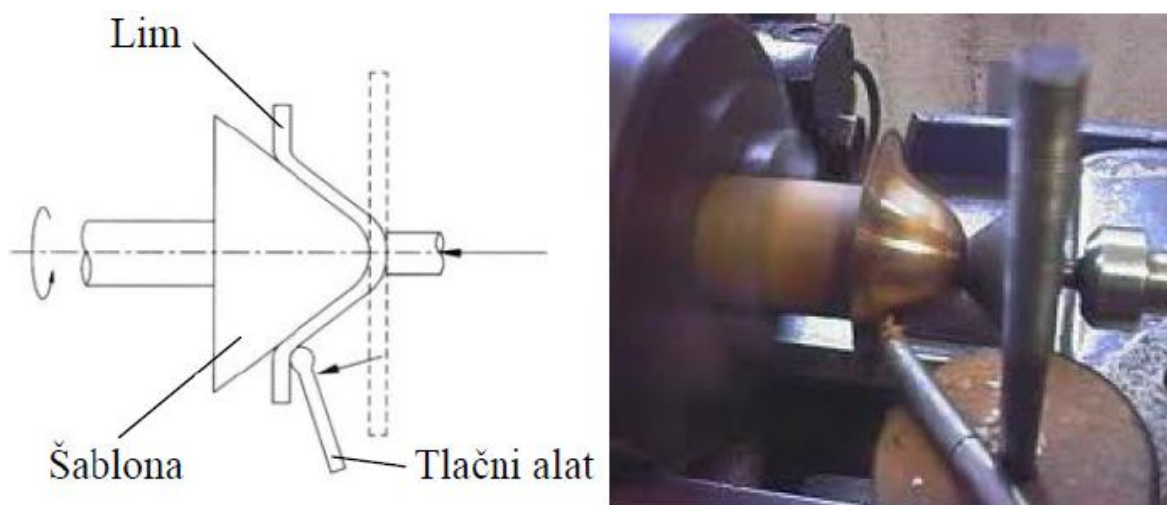
Slika 1.2. Primjeri obradaka rotacijskog optiskivanja [1]

2. RAZRADA TEME

2.1. Razvoj rotacijskog optiskivanja

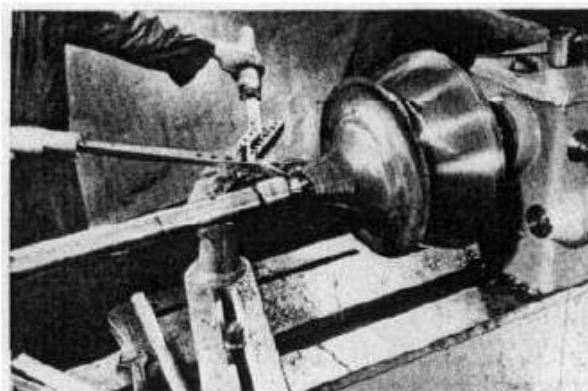
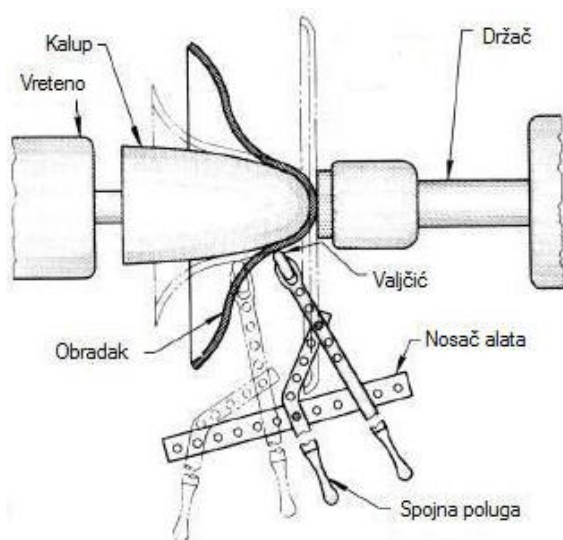
Obrada rotacijskim optiskivanjem primjenjivana je još u doba starih Egipćana (proizvodnja glinenih posuda oblikovana rukom kao alatom) pa se slobodno može reći da pored kovanja predstavlja jednu od najstarijih obrada deformiranjem. Pedesetih godina 20. stoljeća počinje brzi razvoj rotacijskog optiskivanja i sve je šira primjena ove tehnologije u industrijskoj proizvodnji.

Prvi električni stroj za rotacijsko optiskivanje proizveden je negdje oko 1930. godine. Bio je opremljen nosačem alata koji je na sebi imao niz provrta. Oni su omogućavali držaču alata zakret i pomak kako bi se olakšao posao operateru i postigla maksimalna dostupna snaga (slika 2.1). Takav stroj je bio ograničen za rotacijsko optiskivanje laganih i tankih obradaka i pogodan samo za maloserijsku proizvodnju.



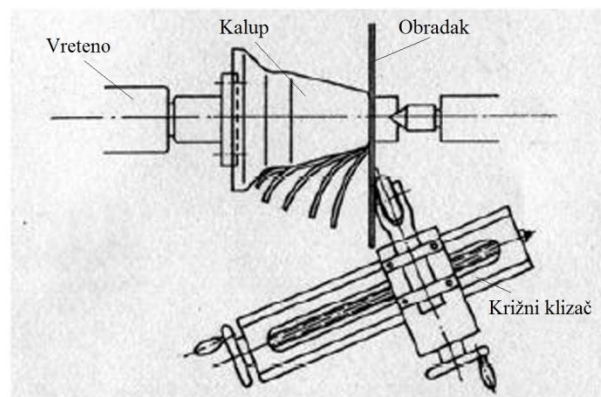
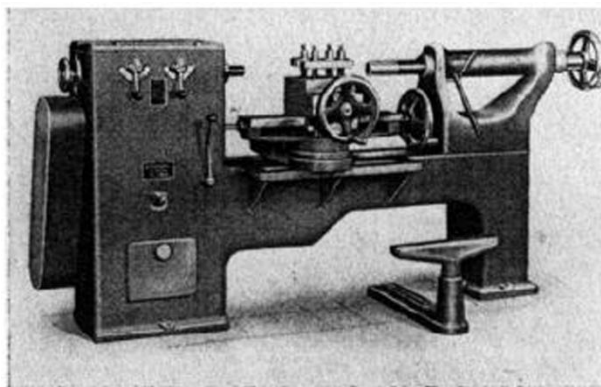
Slika 2.1. Klasičan stroj za rotacijsko optiskivanje [1]

I prije je postojala potreba proširiti područje primjene. Tako je došlo do razvoja poluge nosača alata. Držač alata montirao se na spojnu polugu koja je montirana na nosač alata. Spojna poluga u kombinaciji sa nosačem i držačem je omogućavala operateru više utjecaja na samu deformaciju i veću fleksibilnost u odnosu na prijašnju tehniku.



Slika 2.2. Klasičan stroj za rotacijsko optiskivanje sa spojnom polugom [7,8]

Uvođenjem strojava opremljenih sa poprečnim i križnim klizačem, na kojem se nalazio alat za oblikovanje deformiranjem, olakšao je operateru manipulacijsko pomicanje valjka. Kao što je prikazano na slici 2.3. operater je lako mogao pomicati alat okretanjem ručice za upravljanje i tako jednostavno optiskivati veće i deblje materijale.

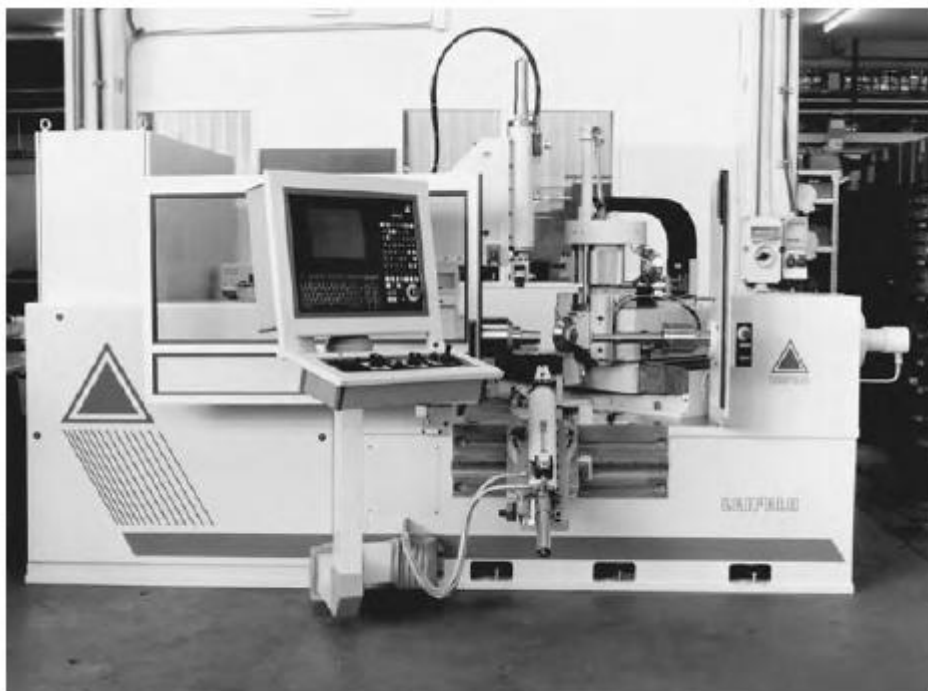


Slika 2.3. Klasičan stroj za rotacijsko optiskivanje sa križnim klizačem

Tek 1945. godine pojavile su se prve varijante hidrauličkog rotacijskog optiskivanja. Hidraulički pogonjeni strojevi su proizvođačima omogućili deformiranje još većih i debljih obradaka zbog lakšeg generiranja snage za oblikovanje deformiranjem nego kod ručnih i mehaničkih postupaka. Oni su bili preteča u razvoju kopirnih strojeva. Kopirno rotacijsko optiskivanje smatra se prvim prijelaznim korakom sa ručnog rotacijskog optiskivanja na automatsko. Razvoj automatskih strojeva za rotacijsko kopirno optiskivanje omogućilo je masovnu proizvodnju visoko preciznih rotacijskih proizvoda. Uporabom šablona (predložaka) i kopirnog ticala, svaki se proces rotacijskog optiskivanja mogao individualno kontrolirati. Jedini nedostatak kopirnog optiskivanja je vrijeme potrebno za podešavanje i preoblikovanje individualnih šablona (predložaka) za ispravno gibanje alata. Zbog tog nedostatka, bilo je poželjno razviti stroj za rotacijsko optiskivanje koji je imao kraće proizvodno vrijeme i mogao proizvesti komponente s poboljšanom kvalitetom.

Ti zahtjevi doveli su do razvoja CNC strojeva za rotacijsko optiskivanje u ranim sedamdesetim. CNC strojevi pokazali su značajne prednosti u rotacijskom optiskivanju od prethodnih kopirnih strojeva. Neke od tih prednosti odnose se na relativno niske troškove alata, brzu i ekonomičniju prilagodbu za alate i programe te kraće proizvodno i pripremno-završno vrijeme. Osim toga, CNC strojevi omogućili su veću fleksibilnost proizvodnje i programabilnost putanje alata što je u konačnici omogućilo proizvodnju složenih dijelova deformiranjem. Nedostaci CNC upravljanog stroja su visoke cijene opreme i činjenica da je još uvijek potreban iskusan operater s potrebnom vještinom programiranja.

Daljnjim razvojem numeričkih strojeva u osamdesetim godinama dolazi do razvoja PNC tehnologije („*Playback numerical control technology*“). PNC tehnologija omogućila je CNC stroju da se programiranje ne izvodi numeričkim unosom podataka, već da program snima putanju alata dok je stroj pod ručnim režimom rada tj. pod stručnom kontrolom operatera. Slika 2.4. prikazuje prikazuje CNC stroj opremljen PNC-om.

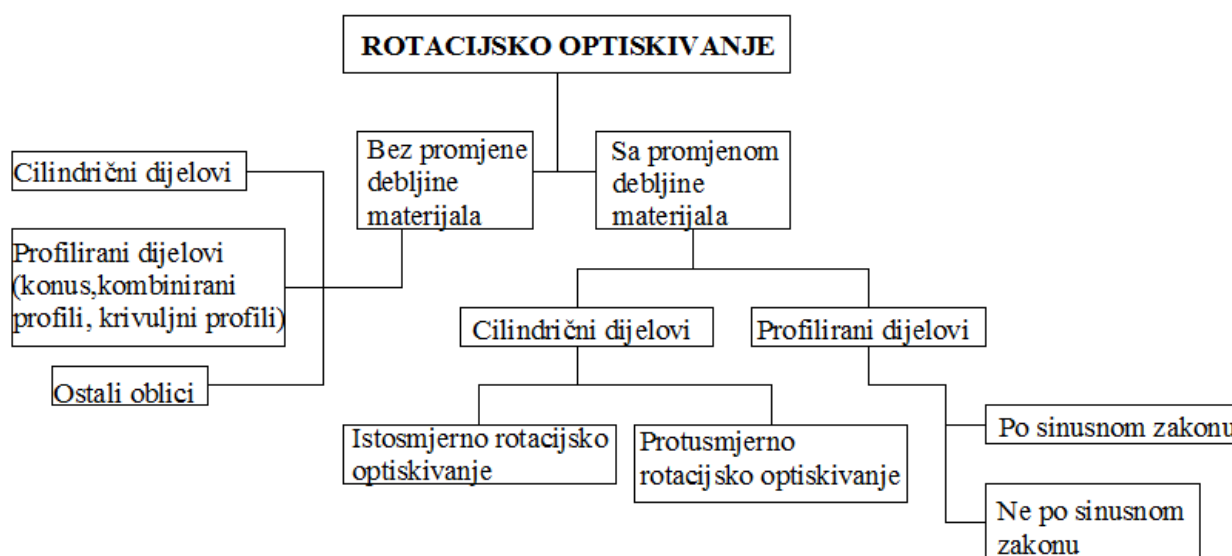


Slika 2.4. CNC upravljani stroj za rotacijsko optiskivanje sa PNC-om [7,8]

U 21. stoljeću CNC strojevi za rotacijsko optiskivanje posjeduju vizualni sistem skeniranja „scan system“ i metodologiju kontrole deformacijskih sila. Na taj način im je omogućeno da predvide daljnje kretanje i prilagodbu deformacijske sile brzini vrtnje kalupa i gibanju alata.

2.2. Podjela rotacijskog optiskivanja

Podjelu rotacijskog optiskivanja moguće je izvesti s obzirom na promjenu debljine stjenke, obzirom na geometrijski oblik i obzirom na tehniku izrade kako je shematski prikazano na slici 2.5. Podjela se može načiniti i na osnovi tehnike izrade. Tako razlikujemo: 1. Konvencionalno optiskivanje, 2. Optiskivanje sa prisutstvom velikih sila („powerspinning“), 3. Cijevno optiskivanje



Slika 2.5. Podjela rotacijskog optiskivanja [3]

2.2.1. Rotacijsko optiskivanje bez promjene debljine stjenke obratka

Osnovna karakteristika rotacijskog optiskivanja bez promjene debljine stjenke obratka je da se debljina diska u tijeku procesa ne mijenja. Najčešće se izvede cilindrični i profilni dijelovi. U konvencionalnom rotacijskom optiskivanju okrugli disk se pritisne uz rotirajući kalup za oblikovanje (trn) uz pomoć krutih alata (konjić-držač). Glavno gibanje vrši obradak koji se okreće zajedno sa kalupom i držačem. Sporedno gibanje obavlja alat, u vidu valjčića, koji može izvoditi kretanje u X i Y pravcu, ručno ili hidraulički pokretano, istovremeno se okrećući oko svoje osi. Valjčić pritiskuje lim (disk) koji se okreće oko glavne osi vretena, dovodeći ga pri tome na oblik kalupa (vidi sliku 2.6.). Deformacija se obavlja u više operacija ako se zadovoljavajući stupanj deformacije ne može dobiti iz jedne operacije.

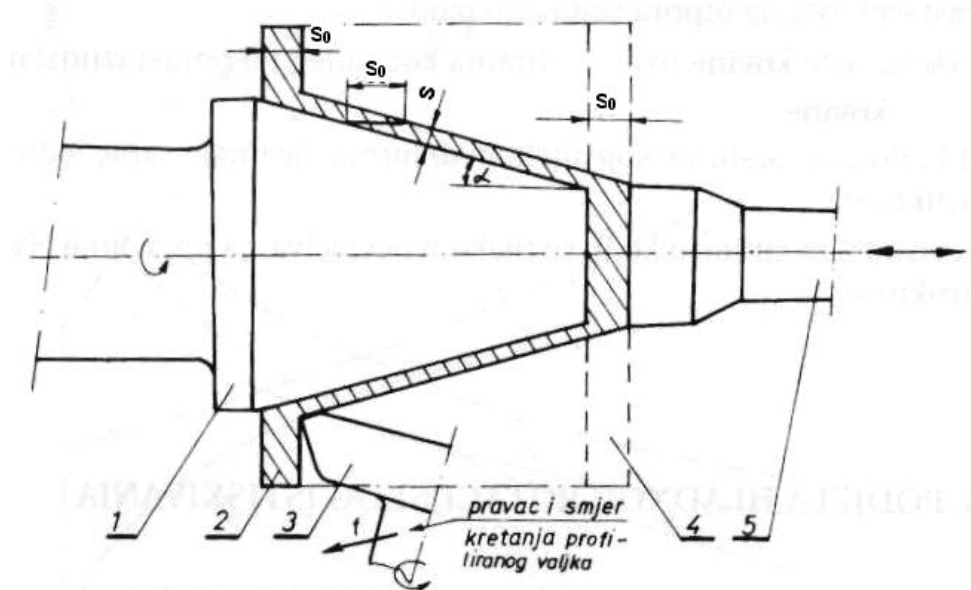
Operacija se načešće izvodi na stroju vrlo sličnom tokarskom stroju (konvencionalnom ili NC – upravljanom) pri sobnoj temperaturi. Međutim, optiskivanje se izvodi i na višim temperaturama za komponente s debljim stjenkama i legure sa niskom duktilnošću.

Nakon procesa optiskivanja, kao završna faza kompletnog postupka može se izvršiti odstranjivanje viška materijala i to dok se on još nalazi na kalupu.

Moguće su i neke posebne varijante ove obrade kojima se omogućuje vrlo različit spektar oblika obratka: sužavanje, proširivanje, izrade različitih veličina cijevi sa rebrima te vršenje operacije spajanja.

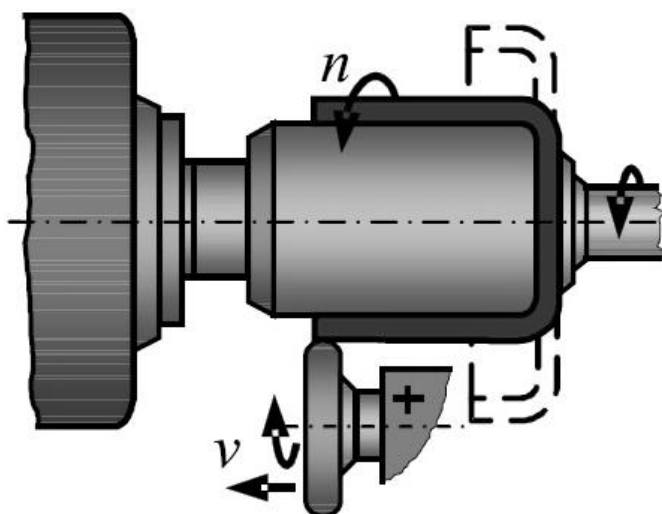
Konvencionalna metoda izrade intenzivno se koristi za prototipe ili za proizvodnju manjih serija do 1000 komada, zbog niskih troškova alata. Veće se količine obično mogu proizvesti po nižoj cijeni sa optiskivanjem korištenjem velikih sila („powerspinning“). Taj proces optiskivanja metala i njihovih legura je poznat kao „Shearspinning“ (smično optiskivanje), gdje ovu metodu oblikovanja karakterizira uporaba velikih smičnih sila (do 3.5 MN). Gotovo svi duktilni materijali se mogu oblikovati uz uvjet da imaju barem minimalno 20% duktilnosti.

Kako je vidljivo na slici 2.6. prikazuje hladno rotacijsko optiskivanje konusnih dijelova sa promjenom debljinom stjenke u odnosu na početnu debljinu materijala. Držačem (5) se pritišće poluproizvod (4) debljine s_0 uz trn (1). Tako ostvarena veza tih elemenata dobiva okretni moment preko glavnog vretena stroja za rotacijsko optiskivanje. Okretanje profiliranog valjka (3) izvodi sila trenja između profiliranog valjka i radnog predmeta (2), dok se pravocrtno kretanje ostvaruje nosačem alata koji se pomiče usporedno s izvodnicom koničnog trna.



Slika 2.6. Shema hladnog rotacijskog optiskivanja konusnog dijela [2]

Kod cilindričnog smičnog optiskivanja se operacija mora izvršiti u više prolaza



Slika 2.7. Cilindrično smično optiskivanje sa jednim prolazom [9]

2.2.2. Rotacijsko optiskivanje sa promjenom debljine stjenke obratka

Rotacijsko optiskivanje sa promjenom debljine stjenke obratka je postupak koji za vrijeme procesa pored oblikovanja obratka natiskivanjem na kalupu vrši i smanjenje debljine stjenke obratka. Očigledna je analogija ovog postupka sa dubokim vučenjem sa redukcijom debljine i sa istosmjernim istiskivanjem šupljih obradaka.

Moguća je izvedba na dva načina:

- istosmjerno rotacijsko optiskivanje
- protusmjerno rotacijsko optiskivanje

2.2.2.1. Istosmjerno rotacijsko optiskivanje

Kod istosmjernog postupka hladnog rotacijskog optiskivanja, profilni valjci se pomiču uzduž osi trna ka slobodnom kraju radnog predmeta. Pri tome se profilni valjci i nedeformirani dio radnog predmeta pomiču u istom smjeru (vidi sliku 2.8.).

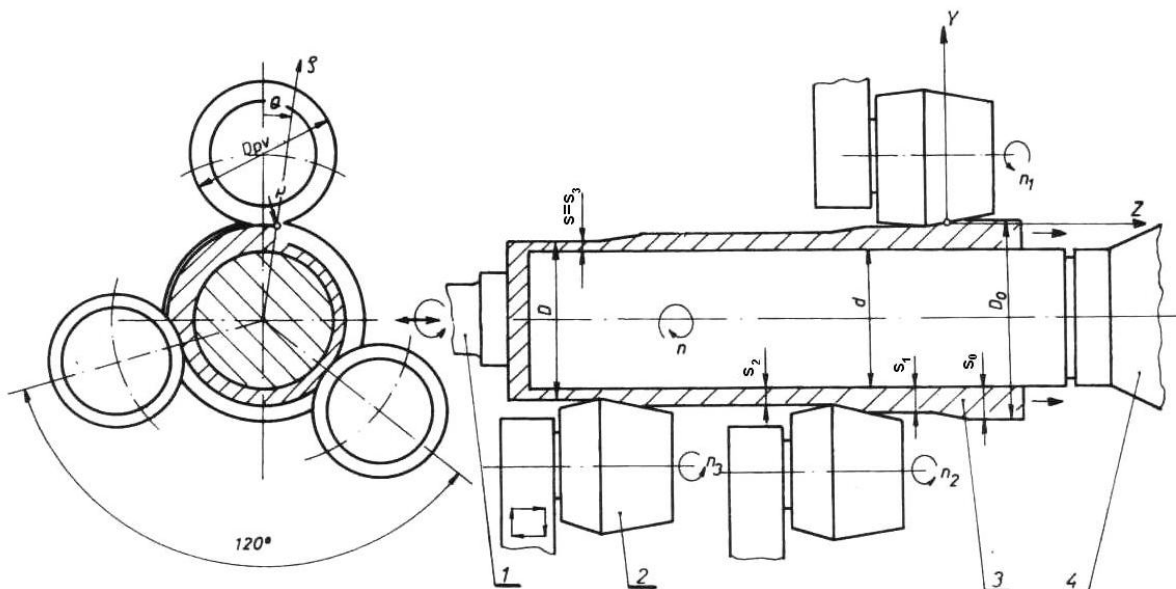
Trn dobiva rotacijsko gibanje od glavnog vretena stroja, dok se profilni valjci zaokreću silom trenja koja nastaje između njih i radnog komada. Aksijalni posmak profilnih valjaka ostvaruje njihov nosač, a on autonomnim pogonom izvodi pomoćno pomicanje.

S prednje je strane radni predmet pritisnut uz trn pritiskačem koji se okreće zajedno s trnom i radnim predmetom.

Obradak za ovu vrstu operacije može biti:

- ravni limeni disk
- pripremak dobiven dubokim vučenjem ili rotacijskim optiskivanjem
- pripremak dobiven hladnim istiskivanjem
- cijev

Slika 2.8. prikazuje shemu hladnog istosmjernog rotacijskog optiskivanja s promjenom debljine stijenke obratka gdje je obradak ravni limeni disk. Disk se steže pomoću držača (1) na kalup (4). Glavno gibanje vrši kalup koji je pričvršćen na radno vreteno.

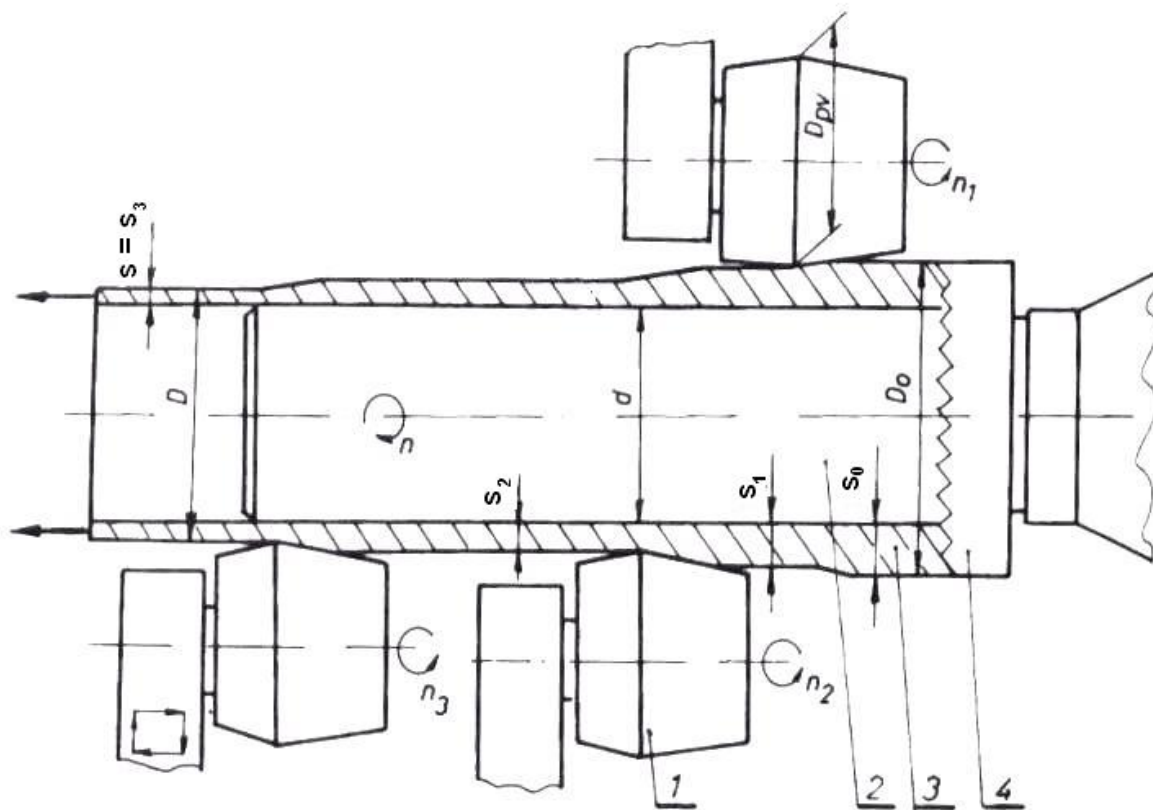


Slika 2.8. Shema istosmjernog rotacijskog optiskivanja sa promjenom debljine stijenke
(1- držač; 2 - profilni valjak; 3 - radni predmet; 4 - kalup) [2]

2.2.2.2. Protusmjerno rotacijsko optiskivanje

Kod protusmjernog rotacijskog optiskivanja sa promjenom debljine obratka, materijal teče u suprotnom smjeru od smjera gibanja alata. Pripremak se postavlja na kalup i to tako da se svojom čeonom stranom oslanja na čeonu graničnik radnog vretena, a valjci se kreću u naznačenom smjeru (slika 2.9. Protusmjerno rotacijsko optiskivanje s promjenom debljine stjenke).

Pri izvođenju protusmjernog rotacijskog optiskivanja, profilni valjci (1) se pomiču uzduž osi kalupa (2) prema nazubljenoj prirubnici (4) prema uklinjenom kraju radnog predmeta (3).



Slika 2.9. Protusmjerno rotacijsko optiskivanje s promjenom debljine stjenke
(1 – profilni valjak; 2 – kalup; 3 – radni predmet; 4 – nazubljena prirubnica) [2]

2.3. Ograničenja parametara obrade

Obradak koji se obrađuje rotacijskim optiskivanjem vrši glavno gibanje oko radnog vretena alatnog stroja, a alat vrši pomoćno kretanje (posmak) oblikujući naš obradak po matrici. Brzina glavnog gibanja ovisi o vrsti materijala i geometriji obratka, preporučene brzine se kreću u rasponu od 0,2 m/s do 5 m/s.

Manje vrijednosti odnose se na materijale veće čvrstoće, dok se za optiskivanje mekših materijala mogu koristiti veće brzine u okviru navedenog raspona.

Za obradu čeličnih materijala brzine ne smiju prelaziti 2 m/s.

Broj okretaja radnog vretena određuje se prema:

$$n = \frac{60000 \cdot v}{d} \quad \text{1/min}$$

v (m/s) -obodna brzina

d (mm) –promjer matrice (kalupa)

Brzina pomoćnog kretanja (posmaka) zavisna je o samome materijalu i geometriji obratka, kao i o traženoj kvaliteti površine obradka tj. stupnju hrapavosti. Preporučene vrijednosti se kreću u rasponu od 0,2 do 5 (mm/o).

Za postizanje veće kvalitete obratka potrebno je koristiti niže brzine posmaka.

2.4. Prednosti rotacijskog optiskivanja u odnosu na ostale tehnološke postupke

Ovaj tehnološki postupak u odnosu na ostale tehnološke postupke preradbe kovina ima sljedeće prednosti:

- tvrdoća i čvrstoća izratka, ovisno o kakvoći materijala, ostvarenom stupnju deformacije i brzini deformacije nakon hladnog rotacijskog optiskivanja, povećavaju se do 100%;
- ostvaruje se visoka točnost izratka: debljina stijenke ± 0.05 mm, unutarnji promjer (kod otvora do 150 mm) ± 0.05 mm i (kod otvora iznad 150 mm) ± 0.075 mm, po dužini ± 0.12 mm. To često nije moguće ostvariti drugim tehnološkim postupcima kod tankostjenih cilindara, [2];
- kvaliteta obrade odgovara kvaliteti koja se dobiva bušenjem;
- teoretski promatrano, ne postoje gubici materijala, ako se isključe slučajevi dobivanja priprava postupcima prosjecanja ili tokarenja;
- zbog niske cijene alata, hladno rotacijsko optiskivanje dijelova u malim serijama je prihvatljivije od dubokog izvlačenja;
- tijekom procesa hladnog rotacijskog optiskivanja otkrivaju se pukotine i druge pogreške u materijalu, čime se isključuje kasno otkrivanje pogrešaka (poslije završene potpune obrade);
- ekonomičnija je izrada veće količine dijelova složenog oblika u odnosu na postupke dubokog bušenja;
- zavareni spojevi se nakon hladnog rotacijskog optiskivanja znatno poboljšavaju, a uz to su manje uočljivi;
- visokolegirani čelici koji se teško obrađuju skidanjem strugotine (zbog ljepljenja na oštricu), lako se obrađuju hladnim rotacijskim optiskivanjem.

3. PRIMJENA ROTACIJSKOG OPTISKIVANJA U PROIZVODNJI TOPNIČKIH CIJEVI

3.1. Materijali koji se koriste za izradu dijelova oružja

Najveći broj dijelova pješačkog i topničkog oružja izrađuje se od čelika. Zbog različite opterećenosti dijelova tijekom uporabe, za izradu se koriste čelici raznih kvaliteta i mehaničkih svojstava.

Čelici za cijevi mogu se podijeliti na:

- čelike za cijevi streljačkog oružja;
- čelike za cijevi raketnih lansera
- čelike za cijevi minobacača
- čelike za cijevi topničkih oružja (topovi i haubice)

Ti čelici se proizvode prema posebnim tehničkim uvjetima, ovisno o opterećenju i uvjetima rada tijekom uporabe oružja.

Poluproizvodi od kojih se izrađuju dijelovi oružja, su: otkivci, odljevci, otpresci te razni šipkasti i drugi profili dobiveni valjanjem.

Poluproizvodi dijelova oružja, kao što su cilindri protutrzajućih sustava i cijevi minobacača proizvodili su se slobodnim kovanjem. To je poskupljivalo proizvodnju oružja, a i kapaciteti kovačnica su bili preopterećeni. Razvojem tehnologije toplog valjanja bešavnih cijevi, prešlo se na poluproizvode od bešavno valjanih cijevi. Sve vrste minobacačkih cijevi danas se izrađuju iz bešavno valjanih cijevi.

Za cijevi raketnih lansera kao i cijevi nekih netrzajnih topova, također se kao poluproizvodi rabe bešavno valjane cijevi.

3.2. Svojstva čelika za cijevi topničkog oružja

Čelici za cijevi topničkih oružja moraju imati sljedeća fizikalno-mehanička svojstva:

- visoku čvrstoću, dobru elastičnost i žilavost kako pri visokim tlakovima barutnih plinova ne bi došlo do plastične deformacije, puknuća i razaranja;
- dovoljnu tvrdoću i visoku otpornost na udarna opterećenja i mehanička trenja;
- istovrsnu strukturu bez nemetalnih uključaka po dužini i u bilo kojem poprečnom presjeku poluproizvoda;
- visoku otpornost na kemijska djelovanja produkata sagorijevanja i utjecaja atmosfere;
- nizak stupanj širenja puknuća.

Tijekom uporabe cijevi su izložene ekstremnim temperaturnim uvjetima okoline (-40°C do $+50^{\circ}\text{C}$) što pored visokih naprezanja, izazvanih tlakom barutnih plinova, dodatno otežava njihovo stanje naprezanja. Kako se udarna žilavost pri sniženim temperaturama znatno smanjuje, tako čelici moraju raspolagati s dovoljnom pričuvom udarne žilavosti na uobičajenim temperaturama. Čelici koji ne posjeduju dovoljnu pričuvu u udarnoj žilavosti, pri sniženim temperaturama okoline (od -15°C do -40°C) prelaze u kritično područje krhkosti.

Naime, razaranju žilavih čelika prethodi pojava plastične deformacije, dok čelicima s niskom žilavošću, odnosno krhkim čelicima, razaranju ne prethodi plastična deformacija. Tako je za većinu čelika na temperaturi okoline ispod -40°C , pri opterećenju znakovit krhki lom bez prethodne pojave plastične deformacije. To se kod cijevi oružja mora izbjeći.

Od legirajućih elemenata se traži da čeliku za cijevi daju visoku čvrstoću, potrebnu pričuvu u udarnoj žilavosti i dobru prokaljivost debelostijenih cijevi. Nikal je legirajući element koji svojom nazočnošću čeliku poboljšava sva nabrojena svojstva. Molibden također poboljšava mehanička svojstva i prokaljivost čelika.

Zato su čelici za krhkosti popuštanja. Krhkost popuštanja je pojava kada u procesu popuštanja nekih legiranih čelika pri sporom hlađenju (u peći ili na mirnom zraku) na temperaturi od $600\text{--}430^{\circ}\text{C}$ dolazi do velikog smanjenja žilavosti. Pojavljuje se kod čelika koji imaju nešto veći sadržaj legirajućih elemenata mangana, kroma i nikla, te fosfora, antimona, arsena i cinka kao nečistoća u relativno maloj količini.

Pojava krhkosti popuštanja objašnjava se segregacijom atoma legirajućih elemenata i nečistoća (uglavnom fosfora) na granicama kristalnih zrna i obogaćivanjem njihovih površinskih slojeva legirnim elementima i nečistoćama.

Krhkost popuštanja možemo izbjeći smanjivanjem sadržaja nečistoća u čeliku, dodavanjem čeliku manjih količina molibdena (0.2-0.3%) ili volframa (0.5-0.7%), brzim prelaženjem temperaturnog intervala od 600-430°C u procesu hlađenja. To je za cijevi od posebnog značaja, jer se pri gađanju zagrijavaju do temperatura od oko 400°C.

Ako su nikal i molibden u manjku, čelici se mogu legirati kromom.

Kod cijevi se propisuju zahtjevi za sljedeća svojstva:

- Granicu elastičnosti R_e (MPa);
- Konvencionalnu granicu razvlačenja $R_{p0,2}$ (Mpa);
- Vlačnu čvrstoću R_m (MPa);
- Udarni rad loma KU (J);
- Kontrakcija poprečnog presjeka Z (%);
- Istezljivost A (%);
- Lomna žilavost K_{IC} (MPa).

Sve se češće, umjesto granice elastičnosti R_e , propisuje granica proporcionalnosti R_{pr} .

U tablici 3.1. dan je kemijski sastav nekoliko čelika koji se koriste za cijevi i druge bitne dijelove oružja.

Tablica 3.1. Kemijski sastav čelika koji se koriste u konstrukciji oružja [2]

VRSTA ČELIKA	SADRŽAJ ELEMENATA (%)								
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	P	S	Cu
30 NiCrMo16	0,3	0,25	0,4	1,35	4	0,5	-	-	-
Č 4737 T	0,23 0,31	0,24 0,45	0,4 0,6	2,7 3,4	max 0,2	0,4 0,6	-	-	-
Č 5432 T	0,26 0,33	0,15 0,4	0,3 0,6	1,8 2,2	1,8 2,2	0,3 0,5	maksimalno 0,2 0,1 0,25		
(Č 5480 T)	0,3 0,42	max 0,4	0,15 0,55	1,5 2	3,5 4,5	0,3 0,65	maksimalno 0,015 0,01 -		
CNM	0,3 0,36	max 0,4	0,4 0,6	1 1,6	2,5 3,3	0,3 0,45	maksimalno 0,02 0,02 -		

Čelici sa oznakom „T“ pretopljeni su pod troskom i proizvode se u Željezari Ravne (Republika Slovenija), a čelik CNM u Željezari Zenica (Republika BiH).

U tablici 3.2. dana su mehanička svojstva čelika iz tablice 3.1.

Oružja kod kojih se navedeni čelici koriste za cijevi, a i druge bitne dijelove navedeni su u tablici 3.3.

Potrebno je napomenuti da se za proizvodnju cijevi od navedenih čelika traži osiguranje maksimalnih mehaničkih svojstava korištenjem mogućnosti toplinske obrade, dok se za ostale dijelove (zatvarače, zadnjake i dr.), u pravilu traži niža razina mehaničkih svojstava, naravno zbog nižih razina opterećenosti tih dijelova.

Tablica 3.2. Mehanička svojstva čelika iz tablice 3.1. [2]

VRSTA ČELIKA	KONVENCIONALNA GRANICA TEČENJA $R_{p0,2}$ (MPa)	VLAČNA ČVRSTOĆA R_m (MPa)	IZDUŽENJE A (%)	STEZANJE Z (%)	UDARNA ŽILAVOST KU (J)	ŽILAVOST LOMA K_{IC} (MPa)
30 NiCrMo16	Min 980	1180 1340	9	46	Min 34 (-40°C)	3430 (-20°C)
Č 4737 T	Min 930	Min 1030	12	40	27 56 (+20°C)	-
Č 5432 T	Min 1080	Min 1230	10	45	41 (KU 300/3)	-
Č 5480 T	Min 1470	Min 1780	8	35 U 20 P	34 U 27P (KU 300/3)	-
CNM	1175	1300	20	40	-	-

Tablica 3.3. Oružja kod kojih se čelici navedeni u tablici 3.1. koriste za cijevi

VRSTA ČELIKA	OZNAKA ORUŽJA	DIJELOVI ORUŽJA ZA KOJE SE ČELIK KORISTI
Č 4737 T	MB – 60 M 57 LMB – 82 M 69 LMB – 120 M 75 NT – 82 M 60 A H – 105 M 56	Cijev Cijev Cijev Cijev, komora Cijev, zadnjak, zatvarač
Č 5432 T	Zrakoplovni top GŠ – 23 L YU	Oko 70 dijelova, među njima i cijevi, plinska spojnica, sanduk, uvodnik, lokalizator, izvlakač i dr.
Č 5480 T	LMB – 60 M 84 NT – 82 M 79 LMB – 120 M 74	Cijev Cijev, komora, zatvarač Cijev
CNM	H – 122 D – 30 J TH – 152 M 84 „NORA“	Cijev, zadnjak, zatvarač, matica zadnjaka Cijev, zadnjak, zatvarač, matica zadnjaka

3.3. Promjena mehaničkih svojstava obratka u postupku rotacijskog optiskivanja

Za vrijeme obrade rotacijskim optiskivanjem mijenjaju se mehanička svojstva obratka. Dolazi do usmjeravanja kristalnih zrna materijala kao i do povećanja tvrdoće i čvrstoće materijala uz istovrsno opadanje duktilnosti. To se posebno odnosi na rotacijsko optiskivanje sa promjenom debljine stjenke obratka.

U tablici 3.4. dani su podaci o promjenama mehaničkih svojstava materijala tijekom obrade rotacijskim optiskivanjem sa promjenom debljine stjenke obratka kako bi se vidio odnos porasta granice tečenja, vlačne čvrstoće i opadanje izduženja prije i poslije operacije rotacijskog optiskivanja.

Tablica 3.4. Podaci o promjeni mehaničkih svojstava tijekom obrade rotacijskim optiskivanjem

Debljina stjenke (mm)	Ukupna redukcija (%)	Zatezna čvrstoća (MPa)	Granica tečenja (MPa)	Izduženje (%)
12,70	0	386	229	34
10,40	17,50	541	478	13
8,33	35	572	525	12
4,9	61	592	541	11
4,39	66	600	554	11

3.3.1. Promjena svojstva hladno deformiranih kovina

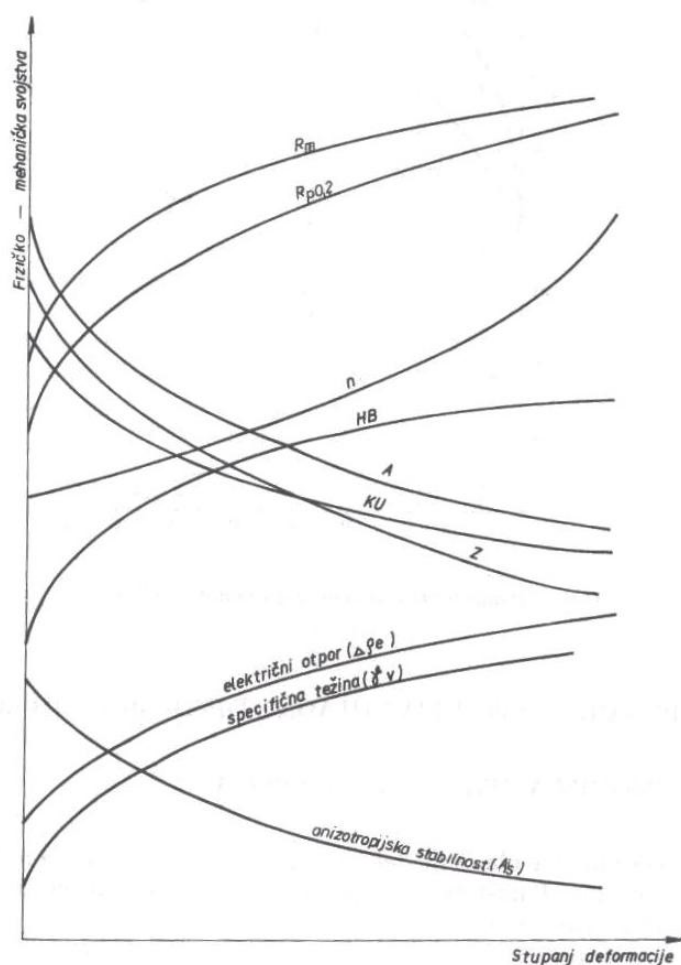
U procesu hladne plastične deformacije, dolazi do promjene mehaničkih svojstava kovina. Porastom stupnja deformacije, povećavaju se sljedeća mehanička svojstva (slika 3.3):

- tvrdoća (HB);
- konvencionalna granica razvlačenja ($R_{p0,2}$);
- vlačna čvrstoća (R_m).

Istodobno dolazi do pada sljedećih mehaničkih svojstava:

- istezljivost (A);
- kontrakcija poprečnog presjeka (Z);
- udarni rad loma (KU).

Broj savijanja (n) kao mehanička značajka materijala, povećava se ili smanjuje, što ovisi o vrsti materijala.



Slika 3.1. Promjene fizičko-mehaničkih svojstava ovisno o stupnju deformacije pri plastičnoj deformaciji kovina u hladnom stanju

3.3.2. Analiza mehanizma očvršćenja materijala za toplo i hladno oblikovanje

Karakteristika oblikovanja deformiranjem u hladnom stanju jest pojava očvršćenja praćena zaostalim naprezanjima. Ukoliko se deformiranje obavlja na povišenim temperaturama, uvjeti za nastajanje očvršćenja se mijenjaju. Povišena temperatura također dovodi i do promjena u metalu koji je prethodno bio deformiran u hladnom stanju.

Kristali metala poslije oblikovanja deformiranjem u hladnom stanju znatno su deformirani, a međuatomska ravnoteža u njima prisilno je poremećena. Uvjeti za uspostavu prvobitne ravnoteže pri normalnoj temperaturi praktično ne postoje zbog male mogućnosti pomicanja i novog razmještaja atoma.

U zagrijanom metalu, međutim, povećane su amplitude osciliranja atoma oko njihovih ravnotežnih položaja, uslijed čega postoji veća mogućnost postizanja unutrašnje ravnoteže u atomskim rešetkama, odnosno u kristalima.

Plastična prerada metala ostvaruje se najčešće pri visokim temperaturama zbog sniženja otpora deformaciji pri povišenim temperaturama. Ipak u nizu slučajeva plastičnu preradu metala nužno je obavljati u hladnom stanju unatoč tome, što su za takav proces potrebne znatno veće sile i veća potrošnja energije. Tako npr. hladnu preradu izvodimo u slučajevima kada vrućom preradom nije moguće dobiti gotov proizvod u vrućem stanju zbog postizanja određenog oblika i dimenzija, veoma čiste površine, određenih mehaničkih i fizičkih osobina.

Za vrijeme hladne plastične deformacije dolazi do bitnih izmjena svojstava metala izloženog deformaciji. Sa povećanjem stupnja deformacije, povećavaju se pokazatelji otpora deformaciji kao što su: granica elastičnosti, granica proporcionalnosti, granica razvlačenja i zatezna čvrstoća. Istovremeno se umanjuju pokazatelji plastičnosti (relativno izduženje, relativno suženje i udarna žilavost), povećava se električni otpor, umanjuje otpornost na koroziju, toplinsku provodnost i sl. Skupni naziv za te pojave vezane za promjenu mehaničkih i fizikalno-kemijskih osobina metala u procesu plastične deformacije zove se očvršćivanje.

Zbog različite orijentacije ravnina klizanja u zrnima polikristala dolazi do neravnomjerne deformacije polikristala, tj. sva se zrna ne uključuju istovremeno u plastičnu deformaciju. Takva neravnomjernost deformacije polikristala dovodi do povećanja otpora deformaciji i do sniženja plastičnosti metala. U procesu hladne deformacije dolazi do međukristalnih i unutarkristalnih narušavanja, javljaju se mikro pukotine koje se s povišenjem stupnja deformacije povećavaju, što dovodi do smanjenja plastičnosti – metal očvršćava (otvrdnjava). Očvršćivanje metala i smanjenje plastičnosti osobito je intenzivno u početku deformacije (do oko 25%).

Ako se hladno deformirani materijal zagrijava, u njemu mogu nastati novi procesi suprotni procesu očvršćivanja u vidu povrata (odmora) i rekristalizacije. Takvi isti procesi zbivaju se kod plastične deformacije u vrućem stanju (vruće prerade). Naime, kod vruće prerade paralelno sa pojavom očvršćivanja odvija se i pojava povrata i rekristalizacije. Odatle potječe razlika između deformacije u hladnom i vrućem stanju, ili drugim riječima: granicu između hladne i vruće (tope) deformacije čini pojava povrata i rekristalizacije.

U procesu plastične deformacije na povišenim temperaturama (u vrućem stanju) kako je već rečeno istovremeno sa očvršćivanjem uslijed deformacije strukture događaju se i omekšavanja metala zbog rekristalizacije. Po pravilu, otpor deformaciji je niži a plastičnost veća kod većine metala na povišenoj temperaturi. Zbog takve pojave većina tehnoloških postupaka (valjanje, kovanje, prešanje, optiskivanje) izvodi se u vrućem stanju. Postupak plastične prerade u vrućem stanju moguće je izvoditi znatno intenzivnije i pri znatno manjim silama, nego u hladnom stanju.

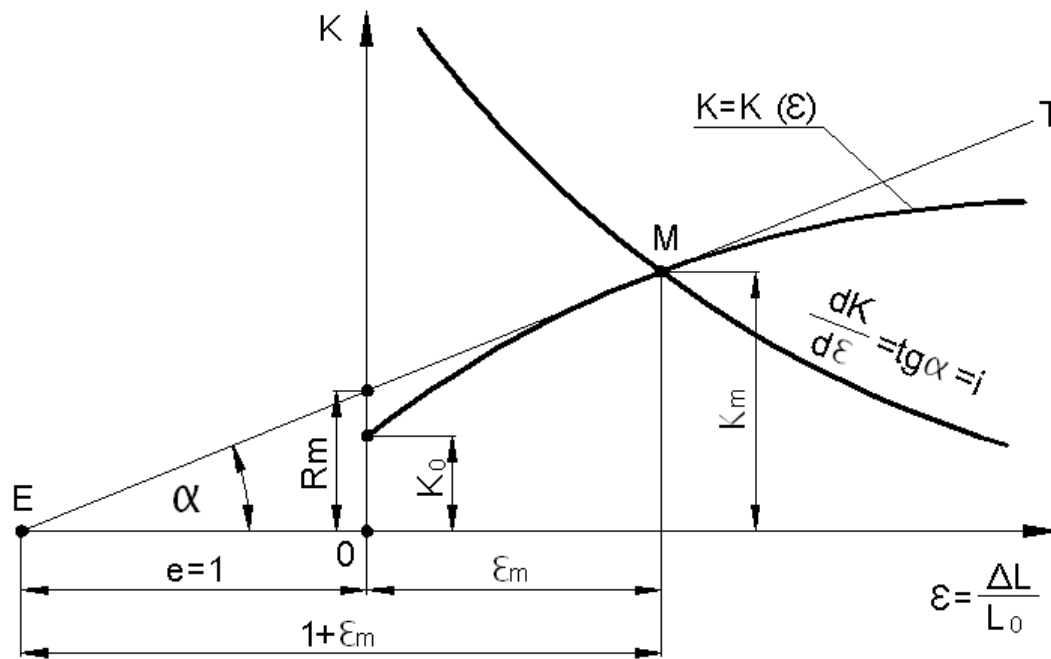
Za vrijeme hladne prerade materijal tako očvršćava da poslije postignutog nekog određenog stupnja deformacije daljnja prerada postaje nemoguća zbog opasnosti od razaranja materijala.

Hladna deformacija se odvija u temperaturnom području ispod približno $0,3 \cdot T_f$ [°C], gdje je T_f temperatura topljenja metala. Vruća deformacija se odvija u temperaturnom području iznad $0,7 \cdot T_f$ [°C].

Da bi se ocijenila sposobnost određenog materijala za očvršćivanje postupkom hladne plastične deformacije, konstruiraju se krivulje očvršćivanja prvog, drugog ili trećeg stupnja. Te krivulje predstavljaju promjenu stvarnih naprezanja (K) ovisno o promjeni stupnja deformacije (ϵ , ψ , ϕ).

Za određivanje krivulja očvršćivanja, koriste se dijagrami nominalnih naprezanja pri istezanju ili savijanju normiziranih epruveta deformiranog materijala. Iz dijagrama se može vidjeti da intenzivnost očvršćivanja (i) opada s porastom stupnja deformacije.

Izgledi krivulja (Slika 3.5.) koje se u literaturi najčešće susreću i njihove jednadžbe dane su na sljedećoj stranici:



Slika 3.2. Krivulja očvršćivanja prvog reda [2]

Jednadžba krivulje očvršćivanja u eksponencijalnom obliku glasi:

$$K = C \cdot \varepsilon^n$$

gdje su: $C = \frac{K_m}{\varepsilon_m^n}$; $n = \frac{\varepsilon_m}{1 + \varepsilon_m}$; $\varepsilon_m = \frac{e_0}{e_m} - 1$.

Nakon zamjene, dobiva se jednadžba:

$$K = R_m \cdot (1 + \varepsilon_m) \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_m} \right) \cdot \exp\left(\frac{\varepsilon_m}{1 + \varepsilon_m} \right); \quad \text{gdje je: } R_m = \frac{F_M}{e_0}.$$

Tangens kuta na krivulju očvršćivanja u točki M (početak oblikovanja suženja):

$$\left(\frac{dk}{d\varepsilon} \right)_m = \frac{K_m}{1 + \varepsilon_m} = \text{tg} \alpha_m.$$

Intenzivnost očvršćivanja:

$$\frac{dk}{d\varepsilon} = \text{tg} \alpha = i.$$

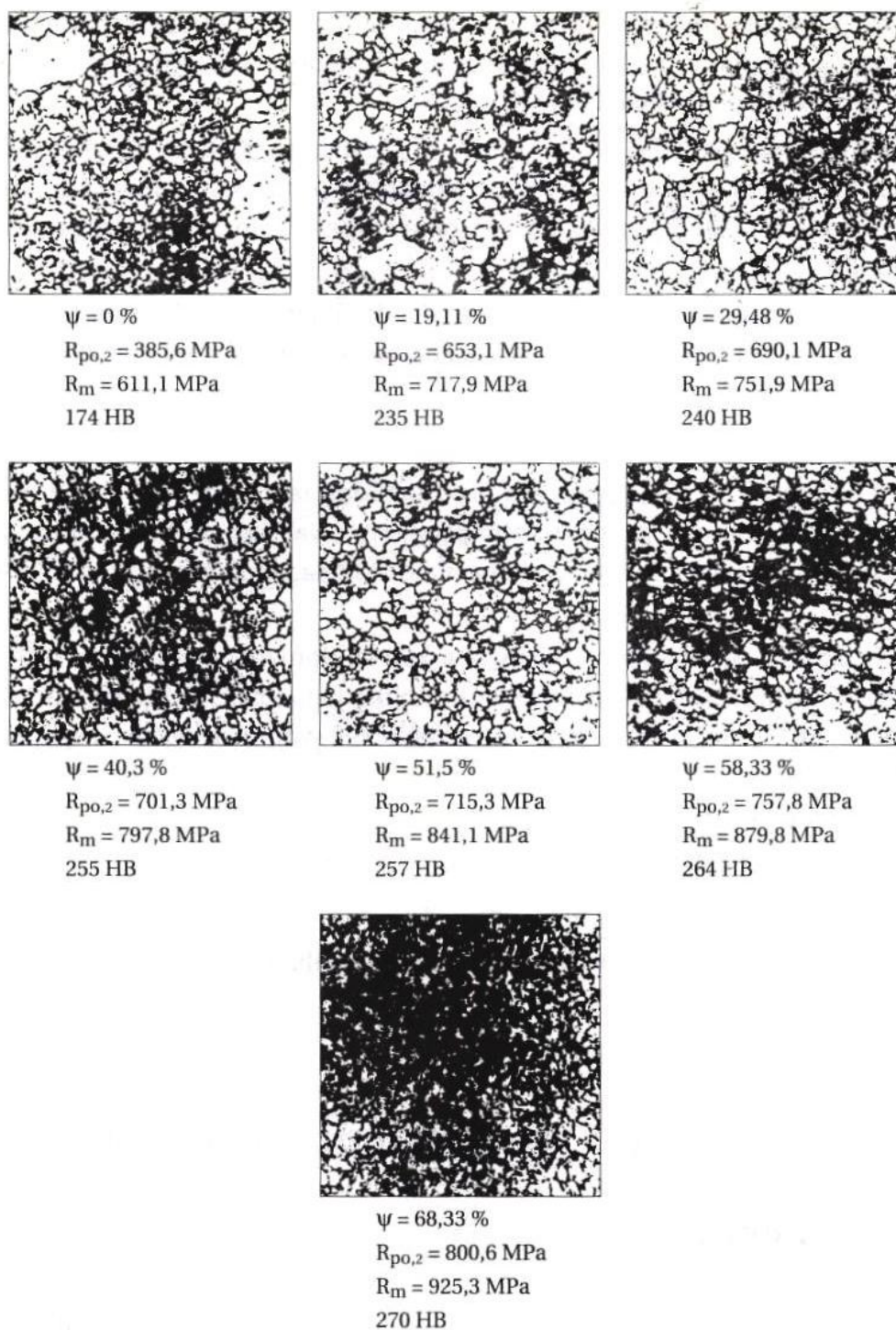
Neke od oznaka u jednadžbama krivulja su:

e_0 - poprečni presjek nedeformirane epruvete;

F_M - vlačna sila epruvete pri vlačnoj čvrstoći materijala R_m

3.3.3. Promjena veličine zrna

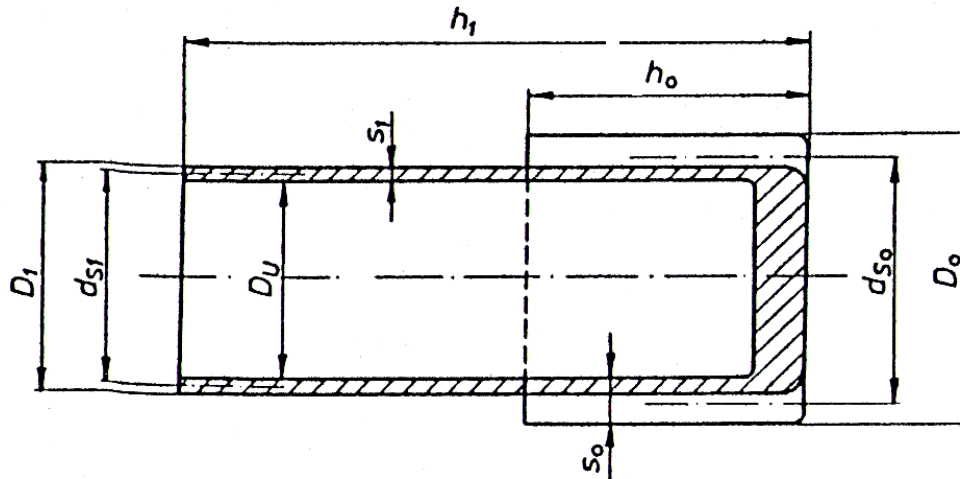
Na slici 3.4. prikazana je promjena veličine zrna i mehaničkih svojstava, ovisno o promjeni stupnja deformacije, kod izratka dobivenog istosmjernim hladnim rotacijskim optiskivanjem od čelika Č 4732 (42 CrMo 4). Ispitivanja su obavljena u BNT poslovnom sustavu Novi Travnik, Bosna i Hercegovina.



Slika 3.3. Promjena veličina zrnaca i mehaničkih svojstava ovisno o stupnju deformacije za čelik Č 4732 (42 CrMo 4); (broj okretaja $n = 200 \text{ min}^{-1}$; posmak $f = 1 \text{ mm / okr.}$); [2]

3.4. Analiza naprezanja i deformacija obratka

Analiza stanja naprezanja i deformacija pri rotacijskom optiskivanju sa promjenom debljine stjenke provest će se na primjeru istosmjernog rotacijskog optiskivanja (slika 3.6).



Slika 3.4. Geometrijski odnosi obratka i sirovca [3]

Kod postupka istosmjernog rotacijskog optiskivanja sa promjenom debljine stjenke, početna debljina stijenke (s_0) smanjuje se tijekom izvođenja procesa na vrijednost s_1 . Zbog te promjene smanjuje se i poprečni presjek sa D_0 na D_1 i istovremeno se povećava visina obratka sa h_0 na h_1 .

Glavne deformacije, prema slici 3.6, mogu se definirati kao:

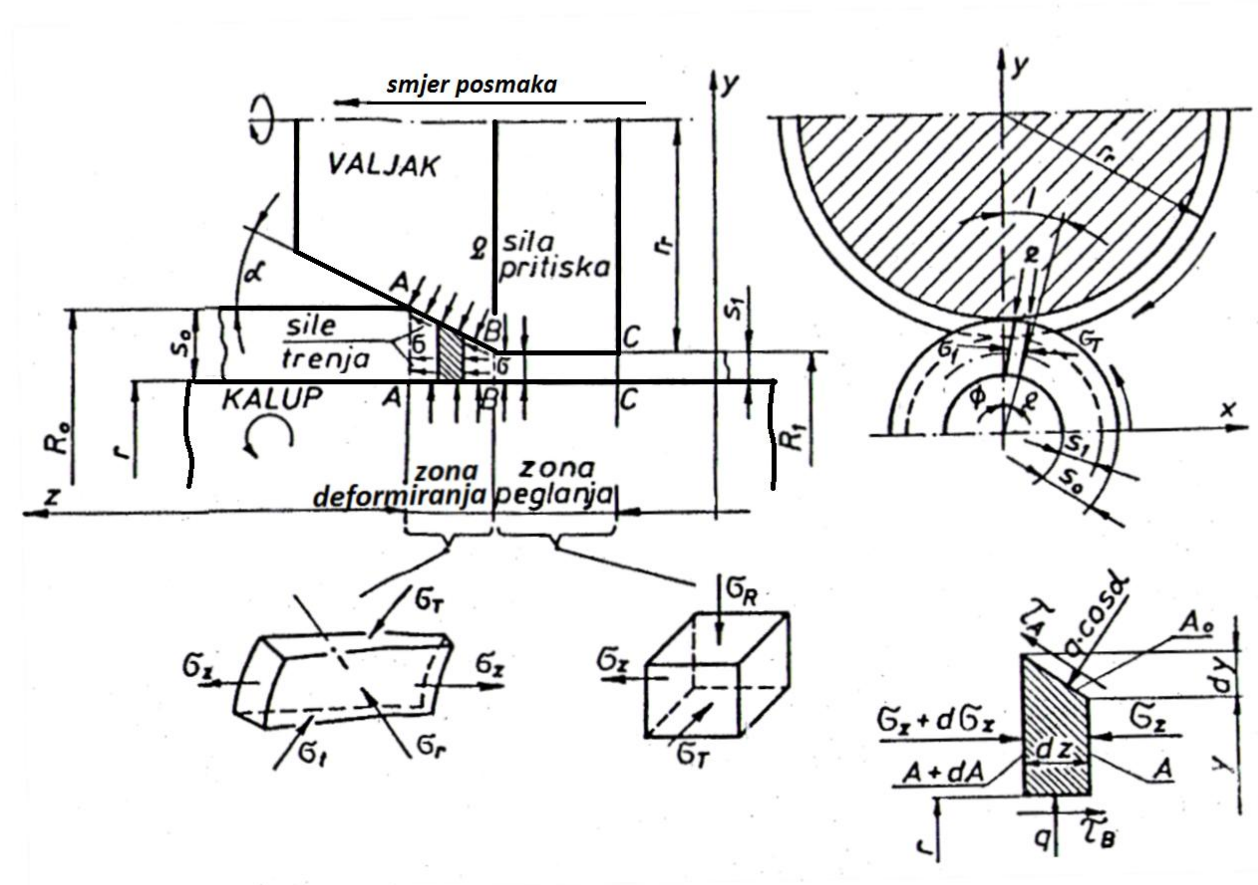
$$\varphi_1 = \ln \frac{h_1}{h_0} > 0$$

$$\varphi_2 = \ln \frac{d_{s1}}{d_{s0}} \cong 0$$

$$\varphi_3 = \ln \frac{s_1}{s_0} < 1$$

Deformacija dužine φ_1 je pozitivna dok je deformacija debljine stijenke φ_3 negativna.

Analiza naprezanja provest će se pomoću metode presijeka (Slika 3.7). Na slici je prikazana konfiguracija elemenata procesa: radnog valjka, kalupa i obratka kojemu se smanjuje debljina stijenke. Uočava se da valjak djeluje na materijal sa dvije različite površine: pod kutem α (A-B) i površinom paralelnom sa izvodnicom radnog komada (B-C). Prvi dio valjka vrši deformiranje, a drugi peglanje (glačanje) prethodno deformirane zone.



Slika 3.5. Zona deformiranja i naprezanja kod rotacijskog optiskivanja sa promjenom debljine stijenke [3]

Materijal je u zoni deformiranja pod djelovanjem prostornog napregnutog stanja. Aksijalno naprezanje σ_z je pozitivno dok su druga dva σ_r i σ_t negativni. U zoni glačanja na materijal također djeluje vlačno aksijalno naprezanje uz istodobno djelovanje radijalnog i tangencijalnog naprezanja. Te komponente naprezanja su, međutim, u području glačanja neznatne po veličini u odnosu na zateznu komponentu naprezanja pa se daljnja analiza odnosi isključivo na područje deformiranja.

Izraz za veličinu naprezanja u aksijalnom smjeru, [3]:

$$\sigma_z = 1,15 \cdot \sigma_{e,sr} \cdot \frac{b}{2 \cdot \left(\frac{s_0 - s_1}{s_0} \right)^{\frac{b-2}{2}} - 2} \quad (1)$$

U izrazu (1) vrijednost $\sigma_{e,sr}$ predstavlja srednje efektivno naprezanje koje se dobije kao, [3]:

$$\sigma_{e,sr} = \frac{\sigma_{e,0} + \sigma_{e,1}}{2} \quad (2)$$

$$b = \frac{1}{\cos \alpha} + \frac{\mu_2}{\sin \alpha} - \frac{\mu_1}{\frac{y}{r} \cdot \tan \alpha}$$

gdje su:

μ_1 – koeficijent trenja između kalupa i unutarnje stijenke obratka

μ_2 – koeficijent trenja između alata i materijala

s_0 – početna debljina stijenke

$\sigma_{e,0}$ - efektivno naprezanje za vrijednost deformacije u presjeku A-A

$\sigma_{e,1}$ - efektivno naprezanje za vrijednost deformacije u presjeku B-B

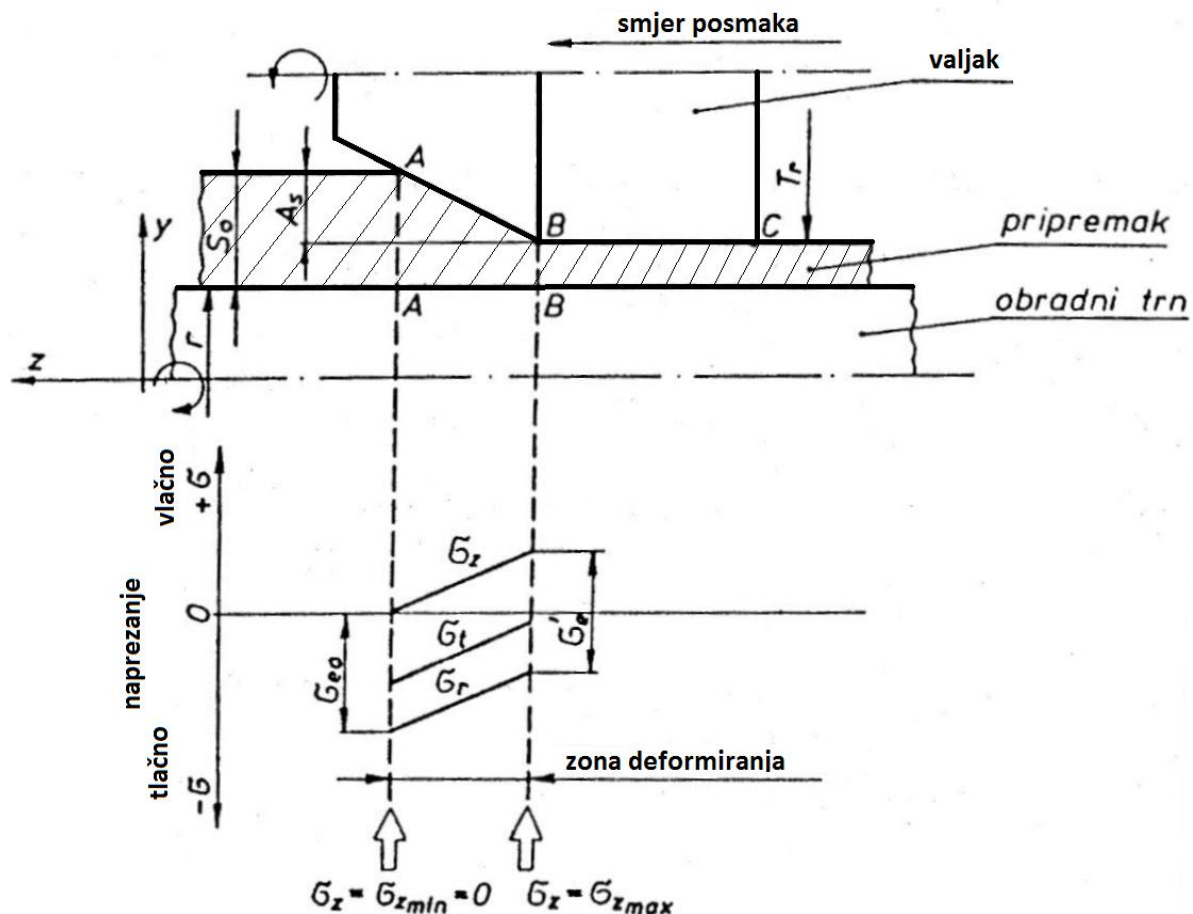
Izraz za veličinu naprezanja u radijalnom smjeru, [3]:

$$\sigma_r = 1,15 \cdot \sigma_{e,sr} \cdot \frac{1}{2 \cdot \left(\frac{s_0 - s_1}{s_0} \right)^{\frac{b-2}{2}} - 2} \left[b \cdot \left(\frac{s_0 - s_1}{s_0} \right)^{\frac{b-2}{2}} - 2 \right] + 4 \quad (3)$$

Izraz za veličinu naprezanja u tangencijalnom smjeru:

$$\sigma_t = 1,15 \cdot \sigma_{e,sr} \cdot \frac{1}{2 \cdot \left(\frac{s_0 - s_1}{s_0} \right)^{\frac{b-2}{2}} - 2} \left[b \cdot \left(\frac{s_0 - s_1}{s_0} \right)^{\frac{b-2}{2}} - 1 \right] + 2 \quad (4)$$

Raspored sve tri komponente naprezanja u zoni deformiranja prikazan je na sljedećoj stranici na slici 3.8.



Slika 3.6. Naprezanja u zoni deformiranja kod rotacijskog optiskivanja sa promjenom debljine stjenke [3]

3.5. Deformacijske sile

Prostorni vektor sile, koja se pojavljuje kod rotacijskog optiskivanja, moguće je podijeliti na tri komponente:

- aksijalnu F_Z
- radijalnu F_R
- tangencijalnu F_T

Komponente deformacijske sile određuju se kao proizvod komponente naprezanja i projekcije površine kontakta alata i materijala za dani pravac.

Projekcija površine u z -pravcu (aksijalno) je, [3]:

$$A_z = \sqrt{\frac{d_1 \cdot d_w}{d_1 \cdot d_w}} \cdot \left(\frac{v}{n}\right) \cdot s_1$$

gdje su: d_I – promjer kalupa

d_w – promjer valjka (alata)

$\frac{v}{n}$ – pomak alata po okretaju kalupa

Komponenta sile (Slika 3.9) u aksijalnom pravcu iznosi, [3]:

$$F_Z = 1,15 \cdot \sigma_{e,SR} \cdot \frac{b}{2 \cdot \left(\frac{s_0 - s_1}{s_0} \right)^{\frac{b-2}{2}}} \cdot \sqrt{\frac{d_1 \cdot d_w}{d_1 + d_w}} \cdot \left(\frac{v}{n} \right) \cdot s_1$$

Ostale dvije površine dane su izrazima, [3]:

$$A_R = \rho_w \cdot \sin \alpha_R \cdot \sqrt{\frac{d_1 \cdot d_w}{d_1 + d_w}} \cdot \left(\frac{v}{n} \right) \cdot \tan \frac{\alpha_R}{2}$$

gdje je:

$$\alpha_R = \arccos \frac{\rho_w + s_1}{\rho_w + s_0}$$

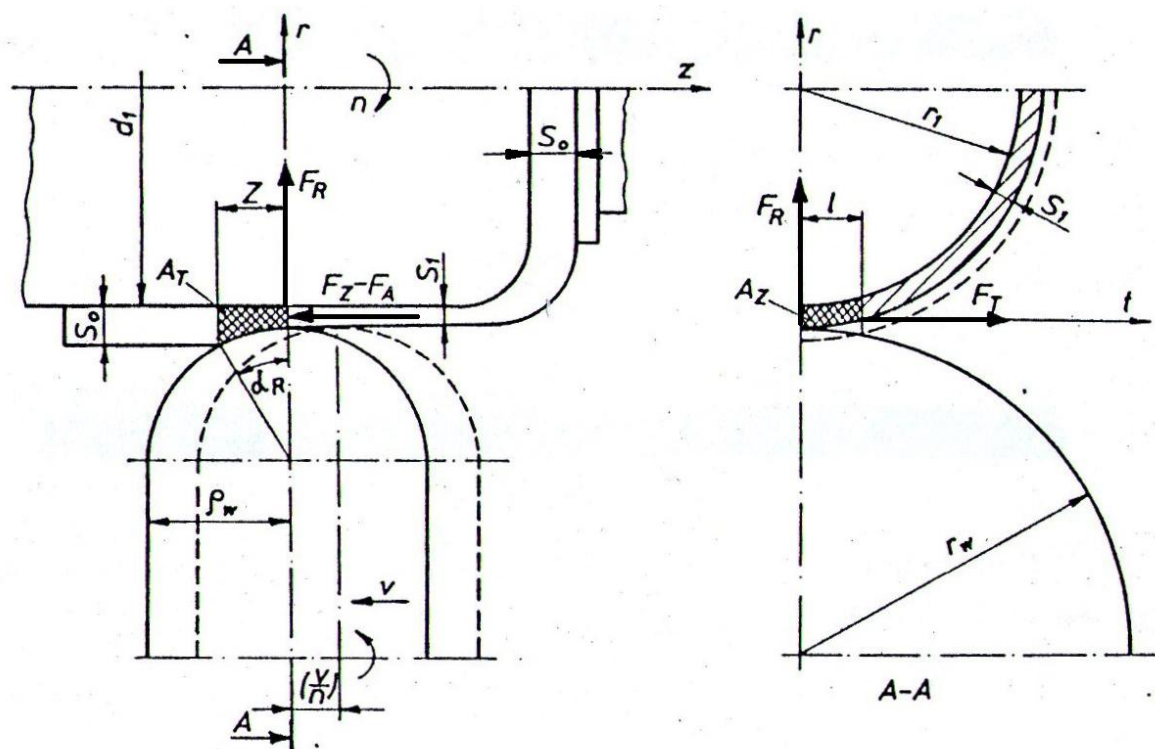
$$A_T = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{s_0 - s_1}{s_0} \right)^{\frac{b-2}{2}} \cdot \rho_w \cdot \sin \alpha_R$$

ρ_w – polovica presjeka alata u zahvatu

Izrazi za veličinu sila u radijalnom i tangencijalnom pravcu glase (Slika 3.9), [3]:

$$F_R = 1,15 \cdot \sigma_{e,SR} \cdot \frac{1}{2 \cdot \left(\frac{s_0 - s_1}{s_0} \right)^{\frac{b-2}{2}}} \cdot \left[b \left(\frac{s_0 - s_1}{s_0} \right)^{\frac{b-2}{2}} - 2 \right] + 4 \cdot \rho_w \cdot \sin \alpha_R \cdot \sqrt{\frac{d_1 \cdot d_w}{d_1 + d_w}} \cdot \left(\frac{v}{n} \right) \cdot \tan \frac{\alpha_R}{2}$$

$$F_T = 1,15 \cdot \sigma_{e,SR} \cdot \frac{1}{2 \cdot \left(\frac{s_0 - s_1}{s_0} \right)^{\frac{b-2}{2}}} \cdot \left[b \left(\frac{s_0 - s_1}{s_0} \right)^{\frac{b-2}{2}} - 1 \right] + 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{s_0 - s_1}{s_0} \right)^{\frac{b-2}{2}} \cdot \rho_w \cdot \sin \alpha_R$$



Slika 3.7. Komponente sila [3]

3.6. Točnost i kvaliteta obrade

Na točnost obratka utječe čitav niz faktora od kojih su najvažniji:

- vrsta materijala
- dimenzije obratka
- oblik alata
- vrsta optiskivanja (sa ili bez promjene debljine stjenke)
- režimi obrade
- krutost stroja i dr.

Kod rotacijskog optiskivanja sa promjenom debljine stjenke, pored tolerancije čela obratka, od izuzetnog je značenja i tolerancija debljine stjenke s obzirom da se tako dobiveni obratci ne obrađuju naknadnom obradom skidanjem strugotine. U tablici 3.5. dane su orijentacijske vrijednosti odstupanja dimenzija obratka od zadanih.

Tablica 3.5. Vrijednosti odstupanja dimenzija obradaka, [3]:

Unutarnji promjer (mm)	do 150			do 250			do 400			do 600		
Debljina stjenke (mm)	1,0	do 2,0	>2,0	<1,0	<2,0	>2,0	<1,0	<2,0	>2,0	<1,0	<2,0	>2,0
Unutarnji promjer ± (mm)	0,10	0,10	0,15	0,10	0,15	0,15	0,20	0,25	0,25	0,25	0,30	0,35
Zakrivljenost (mm)	0,05	0,05	0,10	0,10	0,12	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,50
Debljine stjenke ± (mm)	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04

Prema kvaliteti obrađene površine, rotacijsko optiskivanje spada u završne obrade. Kvaliteta površine obratka ovisi o kvaliteti površine priprema kao i od veličine posmaka i promjeru alata (valjčića) kojim se vrši optiskivanje. Za postizanje visoke kvalitete površine potrebno je optiskivanje izvoditi sa malim pomakom uz korištenje valjčića (alata) što većeg promjera.

Veličina hrapavosti koja se može postići ovom obradom iznosi $R_a = 0,4 - 1,6 \text{ } [\mu\text{m}]$.

3.7. Temperatura obrade i podmazivanje

Rotacijsko optiskivanje teško obradivih materijala i debelih limova uspješnije se izvodi na povišenim temperaturama.

Zagrijavanje priprema vrši se ili u pećima ili samo lokalno, ako se obrada vrši samo na jednom dijelu komada. U tom se slučaju neposredno ispred alata pomoću plamenika zagrijava područje koje će biti deformirano. Rotacijsko optiskivanje u toplom stanju primjenjuje se najčešće kod izrade dna rezervoara i sličnih proizvoda od debelih, teško obradivih materijala. U tom slučaju vrši se kompletno zagrijavanje priprema u peći. Preporučene temperature na koje se zagrijavaju pojedini materijali dani su u tablici 3.6.

Tablica 3.6. Temperature pri rotacijskom optiskivanju kod povišenih temperatura, [3]:

Materijal	Temperatura priprema za toplo rotacijsko optiskivanje [°C]
Čelik	900-1000
Nehrđajući čelik	850-1000
Nikal	870-1260
Bakar	600-800
Aluminij i njegove legure	350-450

Da bi se smanjilo trenje između alata i materijala u toku procesa vrši se podmazivanje.

Kao mazivna sredstva služe uobičajena sredstva za hlađenje i podmazivanje kod alatnih strojeva (SHIP) ili uljna emulzija. Neka sredstva za podmazivanje u teškim uvjetima rada su, [10]: FAMKOVAL TT SPECIAL (Mazivo izrađeno od termički stabilnog grafita dispergiranog u ulju, obogaćenog dodacima za prijem visokih pritisaka. Koristi se za podmazivanje, hlađenje alata i odvajanje otkivka od kalupa kod operacija polutoplog matriciranog kovanja čelika, odnosno kod deformacije čelika na temperaturama nižim od temperature kovanja); FAMKOVAL TT LIGHT (Mazivo izrađeno od termički stabilnog grafita dispergiranog u ulju, obogaćenog dodacima za prijem visokih pritisaka. Koristi se za podmazivanje i odvajanje otkivka od kalupa kod operacija toplog kovanja lakše obradivih čelika); FAMKOVAL TS (mazivo izrađeno od termički stabilnog grafita dispergiranog u vodi, obogaćenog dodacima za prijem visokih pritisaka. Koristi se u obliku vodene suspenzije za hlađenje i podmazivanje matrica i odvajanje otkivka od kalupa kod toplog matriciranog kovanja pri obradi srednje i teške obrade čelika). U novije vrijeme se koriste biljna ulja ili esteri, koji imaju izvrsnu funkciju podmazivanja i lako se razgrađuju, a nisu opasni za okoliš.

4. ZAKLJUČAK

Svrha ovog rada je prikazati postupak rotacijskog optiskivanja topničke cijevi sa promjenom debljine stjenke koje je sa vremenom vrlo brzo postalo konkurentno ostalim postupcima hladnog deformiranja u pogledu fleksibilnosti proizvodnje.

Sama metodologija temeljena je na tehnologiji sličnoj postupku tokarenja u pogledu gibanja alata i obratka sa izmjenama u komponentama koji služe za deformiranje, a široki raspon komponenata je moguće postići s relativno jednostavnim alatima.

Postupak je podijeljen na rotacijsko optiskivanje sa promjenom debljine stjenke i bez promjene debljine stjenke sa protusmjernim i istosmjernim tečenjem materijala gdje je ustanovljeno da postupak posjeduje značajne prednosti naspram dubokog vučenja, ali i bitne nedostatke.

U radu su navedene vrste materijala pogodne za proizvodnju topničkih cijevi postupkom hladnog rotacijskog optiskivanja sa promjenom debljine stjenke, navedene su glavne formule naprezanja i deformacija te u najkraćim crticama navedene formule za proračun aktivnih sila u postupku rotacijskog optiskivanja sa promjenom debljine stjenke.

5. LITERATURA

- [1.] Slade Ivo: Skripta – Obrada materijala I, drugi dio;
- [2.] Vinko Pavelić: Specifične tehnologije u proizvodnji oružja; Novi Travnik – Zagreb 1995
- [3.] D. Lazarević, V. Stoiljković: Rotacijsko tiskanje (str. 251 – 294); XVII Savetovanje proizvodnog mašinstva Jugoslavije, Titograd 1983
- [4.] M. Čaušević: Teorija plastične prerade metala; Zenica 1979
- [5.] A. Povrzanović: Obrade metala deformiranjem; Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 1996
- [6.] dr. Branislav Devedžić: Osnovi teorije plastičnog deformisanja metala; Mašinski fakultet u Kragujevcu
- [7.] B. P. Bewlay, D. U. Furrer : Spinnig; ASM International 2006
- [8.] D. Hanafi: Automated Metal Spinning: Visual Tracking and Force Control Methodologies; University of New South Wales 2007
- [9.] M. Jurković : An analysis and modelling of spinnig process without wall-thickness reduction; Faculty of Engineering, University of Rijeka, Rijeka 1999
- [10.] <http://brodimpex.hr/ponuda/fam1/sredstva-za-hladenje-i-podmazivanje-pri-obra-di-metala>